

学校编码: 10384

学号: 25320061152708

分类号__密级__

UDC__

厦门大学

硕士学位论文

暴雨条件下土质边坡大变形损伤破坏的
高效无网格分析

**Efficient Meshfree Simulation of Large Deformation
Rainfall-Induced Soil Slope Failure**

李 凌

指导教师姓名: 王东东 教授

专 业 名 称: 结 构 工 程

论文提交日期: 2009 年 5 月

论文答辩时间: 2009 年 6 月

学位授予日期:

答辩委员会主席: _____

评阅人: _____

2009 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ☒ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

本文深入研究了稳定节点积分伽辽金无网格法的变分构造,在假定应变理论的架构下,提出并比较分析了三种应力计算方法:(1)基于位移梯度的节点应力计算方法;(2)基于光滑应变的节点应力计算方法;(3)基于光滑应变的一致形心应力计算方法。典型数值算例表明,满足变分一致条件与否和精度高低没有必然联系,三种应力计算方法中基于光滑应变的一致形心应力计算方法的精度最高。另外,在稳定节点积分基础上建立了用于饱和土体中稳态渗流分析的伽辽金高效无网格方法,所构造的节点非局部光滑水力梯度不仅具有节点积分效率高的优点,还能满足数值算法稳定性的要求。均匀渗流和自由面渗流两个算例的结果表明,该方法能精确模拟任意均匀渗流场,在求解自由面迭代问题时避免了有限元求解迭代问题时重划网格的工作,迭代收敛速度快,验证了该方法的有效性。

另一方面,降雨诱发非饱和土质边坡破坏是一种主要的边坡破坏形式。为了分析和预测这类边坡失稳问题,本文研究了一套能模拟暴雨条件下非饱和土质边坡大变形损伤破坏的高效无网格方法,并借此探求暴雨渗流作用下土质边坡的突发破坏机理和滑坡发生的影响因素。该方法在稳定节点积分伽辽金无网格法的基础上,引入非饱和土的物理力学性质,采用渗流和大变形弹塑性损伤耦合本构关系来模拟非饱和土质边坡动态破坏的开始与发展过程,其中土质材料的屈服函数采用 Drucker-Prager 准则,损伤准则为基于应变的各向同性损伤函数。利用该高效无网格法求解大变形条件下的渗流与弹塑性损伤耦合方程,避免了传统有限元法求解的困难,能方便地模拟暴雨诱发土质边坡失稳过程中材料的损伤破坏和分离,从而能有效地模拟从剪切带起始到整个边坡失稳的大变形损伤破坏全过程。文中通过典型算例验证了该方法的有效性,同时采用工程上常用的 Bishop 方法进行抗滑安全系数的辅助验证。

关键词: 土质边坡; 高效无网格法; 降雨诱发破坏; 大变形

Abstract

The variational structure of the Galerkin meshfree method based on the stabilized conforming nodal integration (SCNI) is investigated. Under the assumed strain framework, three methods are proposed for the stress evaluation: the direct nodal stress evaluation (DNS), the consistent nodal stress evaluation (CNS), and the consistent centroid stress evaluation (CCS). It turns out that CNS and CCS satisfy the condition of variational consistence whereas DNS does not. A comprehensive numerical comparison of nodal strain energy error norm reveals that the variational consistence does not necessarily lead to more accurate results, while the proposed CCS approach is uniformly confirmed to yield the most favorable stress results. Subsequently an SCNI-based efficient Galerkin meshfree method is presented for the steady Darcy seepage analysis in saturated soil media. This approach exactly meets the integration constraint for linear exactness which corresponds to the requirement to reproduce the uniform seepage solution regardless of meshfree discretization patterns. Both computational efficiency and stability are achieved. Two benchmark numerical tests, the uniform seepage problem and the free surface seepage problem, demonstrate that the present approach has high accuracy and fast convergence.

On the other hand, the rainfall-induced type of unsaturated soil slope failure has been widely recognized as one of the main natural disasters. To analyze and predict this kind of slope failure, a Lagrangian meshfree formulation is presented for large deformation analysis of coupled rainfall-induced slope failure. The present formulation employs a Lagrangian kernel that is formulated purely on the initial configuration and is favorable from the efficiency and stability point of view. The method uses a Lagrangian version of SCNI method to efficiently complete the spatial integration for the meshfree discretized equations. By introducing the physical and mechanical properties of unsaturated soil into SCNI-based Galerkin meshfree method, coupled soil-rainfall seepage equations are given for the proposed formulation. The initiation and propagation of failure in the soil slope is modeled by the coupled constitutive equations of isotropic damage and Drucker-Prager plasticity. The SCNI gradient smoothing also serves as a non-local regularization of material instability and consequently the present method is capable of effectively capture the shear band failure under large deformation. The efficacy of the present method is demonstrated

by simulating the rainfall-induced failure of two typical soil slopes. Moreover, the safety factors of various slopes are also computed by the classical Bishop method to verify the rationality of the proposed approach.

Key Words: soil slope; efficient meshfree method; rainfall-induced damage and failure; large deformation

厦门大学博硕士论文摘要库

目 录

摘 要.....	i
Abstract.....	ii
第一章 绪 论	1
1.1 本文的选题背景.....	1
1.2 有限元法与无网格法.....	2
1.3 无网格法研究的历史及现状.....	3
1.4 本文的主要内容.....	7
第二章 MLS/RK 无网格方法	9
2.1 无网格法的近似理论.....	9
2.2 控制方程与无网格离散.....	11
2.3 线性准确性条件与光滑稳定节点积分 (SCNI)	12
2.3.1 线性准确性条件.....	12
2.3.2 光滑稳定节点积分 (SCNI)	14
2.4 小结.....	17
第三章 基于稳定节点积分的无网格应力计算方法研究	18
3.1 引言.....	18
3.2 变分一致条件.....	18
3.3 应力计算方法.....	20
3.3.1 基于位移梯度的节点应力计算方法(DNS).....	21
3.3.2 基于光滑应变的节点应力计算方法(CNS).....	22
3.3.3 基于光滑应变的一致形心应力计算方法(CCS)	22
3.4 数值算例与讨论.....	22
3.4.1 拉普拉斯问题.....	23
3.4.2 泊松问题.....	25
3.4.3 悬臂梁问题.....	27
3.4.4 承受内压的厚壁圆筒问题.....	30

3.5 小结.....	32
第四章 饱和土体中稳态渗流的无网格模拟	34
4.1 引言.....	34
4.2 渗流问题的无网格近似.....	35
4.3 稳态均匀流算例.....	36
4.4 自由面渗流算例.....	38
4.5 小结.....	42
第五章 渗流与非饱和土的弹塑性损伤耦合方程及其无网格方法 ...	43
5.1 引言.....	43
5.2 非饱和土的本构关系模型与抗剪强度.....	43
5.2.1 非饱和土的基本概念.....	43
5.2.2 非饱和土的性质.....	45
5.2.3 非饱和土的本构关系模型.....	48
5.2.4 非饱和土的抗剪强度.....	49
5.3 有限变形下的物质描述方法.....	50
5.4 渗流与土体耦合控制方程及其无网格离散.....	51
5.4.1 渗流与土体耦合控制方程.....	51
5.4.2 无网格离散方程.....	53
5.5 损伤模型、时间积分与客观应力积分方法.....	55
5.5.1 弹塑性损伤模型.....	55
5.5.2 时间积分方法.....	55
5.5.3 客观应力积分方法.....	56
5.6 小结.....	56
第六章 暴雨诱发边坡大变形损伤破坏的无网格模拟	58
6.1 入渗模式与径流模式.....	58
6.2 降雨边界条件.....	58
6.3 数值算例一.....	58
6.3.1 计算模型.....	58
6.3.2 计算工况 1.....	59

6.3.3 计算工况 2.....	60
6.3.4 计算工况 3.....	65
6.3.5 计算工况 4.....	68
6.3.6 计算工况 5.....	70
6.3.7 计算工况 6.....	72
6.3.8 计算工况 7.....	75
6.3.9 计算工况 8.....	77
6.3.10 计算工况 9.....	79
6.3.11 计算工况 10.....	82
6.3.12 计算工况 11.....	84
6.4 数值算例二.....	86
6.4.1 计算模型.....	88
6.4.2 计算工况 1.....	89
6.4.3 计算工况 2.....	90
6.4.4 计算工况 3.....	92
6.4.5 计算工况 4.....	94
6.4.6 计算工况 5.....	97
6.5 暴雨诱发滑坡影响因素小结.....	99
第七章 结论与展望	106
7.1 结论.....	106
7.2 展望.....	107
参考文献.....	108
致 谢.....	113
作者攻读硕士学位期间撰写的论文	114

Table of Contents

Abstract in Chinese.....	i
Abstract in English	ii
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Motivation of the Thesis	1
1.2 Brief Comparison Between Finite Element Method and Meshfree Method	2
1.3 Overview of Meshfree Method.....	3
1.4 Objective and Scope of the Thesis	7
Chapter 2 Meshfree Approximation Theory	9
2.1 MLS/RK Aproximation	9
2.2 Galerkin Meshfree Discretization.....	11
2.3 Linear Exactness and Stabilized Conforming Nodal Integration Method	12
2.3.1 Linear Exactness	12
2.3.2 Stabilized Conforming Nodal Integration Method (SCNI)	14
2.4 Concluding Remarks	17
Chapter 3 Stress Evaluation for SCNI-based Galerkin Meshfree Method	18
3.1 Introduction.....	18
3.2 Variational Consistence	18
3.3 Methods for Stress Evaluation	20
3.3.1 Direct Nodal Stress Evaluation (DNS)	21
3.3.2 Consistent Nodal Stress Evaluation (CNS).....	22
3.3.3 Consistent Centroid Stress Evaluation (CCS).....	22
3.4 Numerical Comparison and Discussion	22
3.4.1 Laplace Equation	23
3.4.2 Poisson's Equation	25
3.4.3 Cantilever Beam.....	27
3.4.4 Hollow Cylinder under Internal Pressure	30
3.5 Concluding Remarks	32

Chapter 4	SCNI-based Meshfree Method for Steady Seepage Analysis In Saturated Soils	34
4.1	Introduction.....	34
4.2	Meshfree Discretization	35
4.3	Uniform Steady Seepage Problem	36
4.4	Free Surface Seepage Problem	38
4.5	Concluding Remarks	42
Chapter 5	Meshfree Formulation for Coupled Elasto-plastic-damage Soil-seepage Equations.....	43
5.1	Introduction.....	43
5.2	Constitutive Model and Shear Strength of Unsaturated Soil.....	43
5.2.1	Fundamentals of Unsaturated Soil	43
5.2.2	Properties of Unsaturated Soil	45
5.2.3	Constitutive Model of Unsaturated Soil	48
5.2.4	Shear Strength of Unsaturated Soil.....	49
5.3	Lagrangian Meshfree Approximation and Gradient Smoothing with Large Deformation.....	50
5.4	Coupled Soil-rainfall Seepage Equations and Their Meshfree Discretization.....	51
5.4.1	Coupled Soil-rainfall Seepage Equations	51
5.4.2	Meshfree Discretization	53
5.5	Damage Model, Time Integration and Objective Stress Integration	55
5.5.1	Elasto-plastic-damage Model.....	55
5.5.2	Time Integration Method	55
5.5.3	Objective Stress Integration Method	56
5.6	Concluding Remarks	56
Chapter 6	Meshfree Simulation of Large Deformation Slope Failure Induced by Heavy Rainfall	58
6.1	Infiltration Mode and Runoff Mode	58
6.2	Boundary Conditions for Rainfall Seepage	58
6.3	Numerical Example I.....	58
6.3.1	Problem Description and Meshfree Discretization	58
6.3.2	Load Case 1.....	59

6.3.3 Load Case 2.....	60
6.3.4 Load Case 3.....	65
6.3.5 Load Case 4.....	68
6.3.6 Load Case 5.....	70
6.3.7 Load Case 6.....	72
6.3.8 Load Case 7.....	75
6.3.9 Load Case 8.....	77
6.3.10 Load Case 9.....	79
6.3.11 Load Case 10.....	82
6.3.12 Load Case 11.....	84
6.4 Numerical Example II	86
6.4.1 Problem Description and Meshfree Discretization	88
6.4.2 Load Case 1.....	89
6.4.3 Load Case 2.....	90
6.4.4 Load Case 3.....	92
6.4.5 Load Case 4.....	94
6.4.6 Load Case 5.....	97
6.5 Summary of the Influence Factors for Rainfall-induced Slope Failure...	99
Chapter 7 Conclusions.....	106
7.1 Summary.....	106
7.2 Future Research	107
Reference.....	108
Acknowledgments	113
List of Publications	114

第一章 绪 论

1.1 本文的选题背景

我国是一个地质灾害多发的国家,其中又数滑坡最为多见。福建省地处东南沿海,气候温暖湿润,降雨量大且相对集中,台风暴雨较多。同时山地与丘陵面积占全省 90% 以上,山区山坡坡度大,残坡积土发育,厚度较大。特殊的地质环境条件和气候条件决定了福建省为我国地质灾害的主要易发区和多发区之一^[1]。2005 年福建省滑坡灾害最为严重,全省全年共发生滑坡灾害 5934 起,占当年全国滑坡灾害总数的 63.4%^[2]。另外随着经济的发展,公路与地下工程建设越来越多,如跨海隧道、穿山公路和铁路隧道等,这些工程中不可避免的都有人工开挖的边坡,它们的稳定性直接关系到工程的安全施工和运行。2006 年福建省遭受强热带风暴“碧利斯”,暴雨引发的滑坡、泥石流灾害导致了重大经济损失和人员伤亡,直接经济损失超过 30 亿元。因此研究用于边坡稳定分析和滑坡危害评估的方法和手段,对减少灾害造成的生命财产损失有着非常现实而紧迫的意义。

以往地质灾害研究^[1]表明,降雨入渗是福建省发生滑坡的主要动力因素和诱发因素,超过 30% 的滑坡就出现在暴雨当天^[3]。尽管暴雨是边坡失稳的重要诱因已经得到了普遍认可,但其数值仿真研究还不够深入。传统的渗流数值分析大多采用有限元法 (Finite Element Method, FEM),由于边坡稳定性仿真分析过程中往往涉及大变形情况下的流固耦合模拟,网格容易产生畸变,从而要求在变形加大部位重新剖分网格。无网格法 (Meshfree Method, MF) 具有不依赖于节点之间的有序连接的特性,因此能有效缓解大变形时网格畸变这一问题,已经应用于大变形损伤破坏分析^[4, 5]以及渗流分析^[6, 7]中。

数值仿真工具还可以模拟各种可能情况下的边坡动力损伤破坏过程,进行边坡稳定性分析,比较和评价各种设计方案,找出不利因素,为工程的设计、运行和边坡加固提供理论依据,能大大节省工程成本。目前边坡分析常用的数值仿真工具也是有限元法,但有限元由于受到网格拓扑有序连接的限制,对于损伤破坏时材料的大变形非线性分离,模拟起来相当困难,精度相对较低,也不易进行自适应分析。另外有限元法由于是局部近似,网格依赖性强,不能很好地直接模拟应变集中引发的失稳剪切带,而准确计算剪切带的出现和扩展对分析边坡失稳是

至关重要的。

1.2 有限元法与无网格法

自二十世纪六十年代以来,有限元法已成为主要的数值分析方法,广泛应用于土木工程领域的模拟仿真分析^[8]。随着计算机技术的发展,以及如 ANSYS、ADINA、ABACUS、LS-DYNA 等大型有限元商业软件的开发,许多以往复杂难解的力学问题诸如位移应力的数值模拟,已经可以较方便地求解。

但是在用拉格朗日有限元法求解高速撞击、金属冲压成形、裂纹动态扩展、流固耦合、边坡滑动破坏等涉及大变形的问題时,有限元网格往往会发生严重扭曲,不仅需要重划网格,而且严重影响求解的精度。对于裂纹的动态扩展问题,需要在计算过程中不断地重新划分网格以模拟裂纹的动态扩展过程;对于需要时间积分的动态问题,显式时间积分的步长取决于有限元网格的最小尺寸,为达到较满意的精度,需要划分较密的网格,导致时间积分步长过小,大幅度地增加计算量;另外复杂三维结构的有限元网格生成也相当困难。在实际应用中,有限元法仍然存在一些局限性:

- (1) 在有限元分析中网格剖分一直是个难题。目前虽然网格自动化剖分已经取得了很大的进展,但是三维复杂模型的网格剖分依然较为困难。
- (2) 对于大变形问题,变形过大导致单元形状畸变会大大降低有限元的求解精度。
- (3) 移动边界问题诸如裂纹扩展会引起有限元单元整体拓扑信息的改变,因而也一直是有限元求解的难题之一。
- (4) 有限元法中难以建立整体协调的 C^1 形函数,不能方便、有效、直接地求解薄梁板壳结构等高阶问题。另外由于有限元为单元局部近似,也难以有效地模拟应变局部化等问题。
- (5) 相较于位移解,有限元的应力解精度较低。有限元法中近似位移场一般是 C^0 连续的,因而应力、应变在各单元边界上通常不连续,后处理阶段需要采用某些特殊技术以提高应力计算的精度。

产生以上问题的根源在于有限元近似是基于有序连接的单元或网格信息。为了克服这些困难,从 20 世纪 70 年代开始无网格方法的研究逐渐引起了许多学者的关注。无网格法的特点就是通过节点信息直接建立近似函数,由于不依赖节点

之间的有序拓扑连接,可以构造任意高阶的整体协调位移场和应力场,对于传统有限元法求解较困难的问题,有着独到的优势,因而在过去二十余年中无网格法得到了很大发展,已成为计算力学中一个非常活跃的研究方向^[9~13]。

表 1.1 列出了有限元法和无网格法的异同点,二者的主要区别在于无网格法建立近似函数时不借助网格,基于函数逼近近似而非插值。另外,无网格法与经典全域加权残值法的主要区别,是采用定义在离散节点上具有紧支特性的函数而非定义在全域上的级数展开形式来构造近似函数。

表 1.1 有限元法与无网格法的比较

项 目	有限元法	无网格法
几何模型生成	生成网格	生成节点
形函数	基于预定义单元,具有插值特性	基于局部支持域,不具插值特性
是否需要等参变换	需要	不需要
形成系统刚度矩阵	由单元刚度矩阵组装	直接形成整体刚度矩阵
强制边界施加方法	直接施加	依据方法的不同可能需要特别处理
计算速度	快	有些方法较 FEM 慢
精确性	比较精确	比 FEM 更精确
自适应分析	对三维算例困难	容易
后处理技术	比较成熟	与有限元基本相似,但无需光顺化

1.3 无网格法研究的历史及现状

最早的无网格算法可以追溯到 1977 年 LB Lucy 和 Gingold 等人分别提出的光滑粒子法 (Smooth Particle Hydrodynamic method, SPH) ^[14, 15], 这种方法无需网格, 是一种纯拉格朗日方法, 它首先被成功应用于解决无边界天体物理问题。随后 Monaghan 对 SPH 方法进行了深入研究^[16, 17], 并将其解释为核近似方法。1992 年, Nayroles 等人将移动最小二乘近似 (Moving Least Square Approximation, MLS) 引入伽辽金法中, 提出了扩散单元法 (Diffuse Element Method, DEM) ^[18], 并用于分析 Poisson 方程和弹性问题。Belytschko 等人对 DEM 做了两点改进, 在

计算形函数导数时保留了被 Nayroles 忽略的所有项, 并利用拉格朗日乘子法引入强制边界条件, 提出了无单元伽辽金法 (Element-Free Galerkin method, EFG)^[19], 并于 1996 年首次提出将不用单元和网格的数值方法统一命名为无网格方法^[20]。Onate 等人利用移动最小二乘法构造近似函数, 并应用配点法, 把控制方程离散成非积分的形式, 再结合广义有限差分法, 提出了有限点法 (Finite Point Method, FPM)^[21, 22]。

1995 年, Liu 等人利用积分重构函数思想, 基于伽辽金法提出了一种再生核质点法 (Reproducing Kernel Particle Method, RKPM)^[23, 24], 该方法通过核函数变换的方法达到积分的目的, 在问题域内利用尺寸因子可以改变核函数的大小。利用小波分析的伸缩尺度平移、多分辨率等特点, Liu 等人又提出了多尺度再生核质点法 (Multi-Scale Reproducing Kernel Particle Method, MRKPM)^[25, 26], 实现了 RKPM 的自适应分析。为了避免使用背景网格, Beissel 等人提出了节点积分方案^[27], 但计算的稳定性较差。Chen 等人提出应变光滑稳定节点积分方法^[28], 解决了伽辽金弱形式节点积分的稳定性问题, Wang 与 Chen 进一步建立了梁板壳等结构问题无网格分析的稳定节点 (子域) 积分无网格法^[29~35], 然而对于稳定节点积分无网格法的应力计算方法还缺乏深入研究。Zhou 等人基于 RKPM 提出了用于拓扑优化和敏感性分析的无网格方法^[36, 37]。

Oden 和 Duarte 利用移动最小二乘法建立单元分解函数, 用于构造权函数和试函数, 提出了 Hp 云团法 (Hp Clouds)^[38, 39], 并对这种方法进行了严格的数学论证, 该方法适于自适应分析。波兰学者 Liszka 等人改用配点格式, 避免计算伽辽金法的背景网格积分, 称为 Hp 无网格云团法 (Hp Meshless Clouds method)^[40]。

Zhu 和 Atluri 提出局部边界积分方程 (Local Boundary Integration Equation, LBIE)^[41], Atluri 等人在 LBIE 的基础上, 采用移动最小二乘法建立场函数的近似, 用局部 Petrov-Galerkin 法建立无网格形式, 提出了无网格局部 Petrov-Galerkin 法 (Meshless Local Petrov-Galerkin Method, MLPG)^[42, 43], 该方法无需积分背景网格。龙述尧等人提出了弹性力学平面问题的局部 Petrov-Galerkin 方法并进行自适应分析研究^[44, 45]。Chen 等人提出了改进的无奇异局部边界积分方法并用于研究波的传播^[46, 47]。

Sulsky 等人在质点网格法 (Particle in Cell, PIC) 的基础上提出了物质点法

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库